



②① Aktenzeichen: 102 16 338.3  
②② Anmeldetag: 13. 4. 2002  
④③ Offenlegungstag: 23. 10. 2003

⑦① Anmelder:  
Jeschar, Rudolf, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h., 38640  
Goslar, DE; Wassmann, Kurt, Dipl.-Ing., 38685  
Langelsheim, DE

⑥① Zusatz in: 103 17 084.7

⑦② Erfinder:  
gleich Anmelder

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤④ Verfahren zur energetischen stofflichen Verwertung von Reststoffen unter Einsatz von Kaskadenreaktoren

⑤⑦ Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht die energetische Verwertung organischer Feststoffe mit hoher Effizienz. In einem indirekt beheizten Kaskadenreaktor werden diese Stoffe in energetisches Prozessgas umgesetzt. Die erforderlichen thermo-chemischen Reaktionen verteilen sich einsatzstoffspezifisch auf bis zu fünf Reaktionszonen, in denen die Prozesse Wasserverdampfung (Prozessdampferzeugung), thermische Zerlegung (Thermolyse) der Kohlenwasserstoffe, Vergasung des Kohlenstoffes, Umwandlung (Crackung) gasförmiger, parziell kondensierbarer Kohlenwasserstoffe ( $C_mH_n$ ) in unkondensierbares Gas ( $CO + H_2$ ) und die Nachvergasung von Kohlenstoffresten ablaufen können.

Das erzeugte Prozessgas ist nach erfolgter Entstaubung und abhängig vom Schadstoffgehalt der Einsatzstoffe nach chemisch-reaktiver Reinigung für den Betrieb von Gasmotoren oder Brennstoffzellen geeignet. Aus dem vergleichsweise höheren elektrischen Wirkungsgrad der vorgenannten Vorrichtungen resultiert die besondere Effizienz der energetischen Nutzung.

Soweit es sich bei den Einsatzstoffen um Gemische aus organischen und anorganischen Feststoffen oder um einen organisch-anorganischen Materialverbund handelt, ist der anorganische Anteil, zum Beispiel Nichteisen- oder Edelmetalle, nach der Umwandlung des organischen Anteils in Prozessgas für eine stoffliche Verwertung verfügbar.

## Verfahrensziel

[0001] Das Ziel des erfindungsgemäßen Verfahrens ist in der Erzeugung eines energetischen Prozessgases aus organischen Feststoffen, vorzugsweise aus Reststoffen oder Bio-Masse, zu sehen, das in bezug auf die Gasqualität als Brennstoff zum Betrieb von Gasmotoren oder Brennstoffzellen geeignet ist. Damit wird die energetische Nutzung, vorzugsweise in Form von elektrischer Energie, mit hoher Effizienz ermöglicht.

[0002] Als Qualitätsmerkmale für das erzeugte Prozessgas gelten ein entsprechend hoher Heizwert, neben Kohlenmonoxid ein möglichst hoher Anteil an Wasserstoff und das Fehlen gasförmiger, kondensierbarer Kohlenwasserstoffe. Um diese Ansprüche zu erfüllen, sind die als Einsatzstoff definierten organischen Reststoffe oder die Bio-Masse den folgenden Hauptreaktionen zu unterziehen:

- Thermolytische Umwandlung der in den Einsatzstoffen enthaltenen Kohlenwasserstoffe in Prozessgas,
- Umwandlung des in den Einsatzstoffen enthaltenen Kohlenstoffes durch Vergasung in Prozessgas, und
- Umwandlung des Anteils gasförmiger, kondensierbarer Kohlenwasserstoffe ( $C_mH_n$ ) in unkondensierbare ( $CO + H_2$ ).

[0003] Soweit ein Einsatzstoff als ein Gemisch aus organischen und verwertbaren anorganischen Stoffen oder als Materialverbund der genannten Stoffe vorliegt, ist die stoffliche Rückgewinnung der anorganischen und zwar sowohl die Metalle als auch die nichtmetallisch-anorganischen Materialfraktionen als paralleles Verfahrensziel zu sehen.

## Stand der Technik

[0004] Zur Erzeugung von energetischen Prozessgasen aus organischen Feststoffen kommen, dem Stand der Technik entsprechend, vorzugsweise Vorrichtungen wie Drehrohröfen, Wirbelschichtreaktoren, Schachtofen und speziell gestaltete Roste zum Einsatz.

[0005] Der Drehrohrofen wird in der Regel für den Prozess der Gaserzeugung indirekt durch die von außen erfolgende Erwärmung des Drehrohrmantels beheizt. Die Wärmeübertrag auf die Einsatzstoffe wird durch Strahlung, Konvektion und den Kontakt mit der erwärmten Innenfläche des Drehrohres bis zur Temperatur der thermischen Zersetzung (Thermolyse) der Kohlenwasserstoffe erreicht.

[0006] Der Wirbelschichtreaktor, vorzugsweise nach dem System der zirkulierenden Wirbelschicht konzipiert, benötigt ein sogenanntes Bettmaterial. Zur Erzeugung des Wirbeleffektes für das Bettmaterial und die aufgegebenen Einsatzstoffe ist ein Gasstrom, in der Regel atmosphärische Luft und Wasserdampf, erforderlich. Die Reaktion mit Luft ist exotherm, die Reaktion mit Wasserdampf endotherm. Das Verhältnis dieser Vergasungsmittel wird entsprechend der Betriebstemperatur eingestellt. Das in einem Teilstrom mit dem Prozessgas ausgetragene Bettmaterial wird in einem Zyklon abgeschieden und in den Prozess zurückgeführt.

[0007] In Schachtofen erfolgt die Prozessführung zur Erzeugung energetischer Prozessgase sowohl im Gleichstrom als auch im Gegenstrom, bezogen auf das Vergasungsmittel und den Einsatzstoff.

[0008] Die Reaktionen im Drehrohröfen beschränken sich beim thermolytischen Prozess sich auf die Umsetzung des Kohlenwasserstoffanteils der festen organischen Stoffe in Prozessgas. Ein deutlicher Anteil dieses Gases ist kondensierbar. Probleme zeigen sich bei der Abdichtung der Drehrohröfen. Da die Anlage im Unterdruck betrieben werden muss, ist ein Falschlufteinfluss nicht auszuschließen. Im übrigen besteht im Drehrohröfen, über seine konstruktive Länge gesehen, keine Möglichkeit den Prozessablauf wesentlich zu beeinflussen. Eine von außen beeinflussbare Einteilung verschiedener Reaktionszonen ist nicht möglich. Der übrig bleibende Kohlenstoff muss zwangsläufig einer besonderen thermischen Verwertung zugeführt oder in einer zusätzlichen apparativen Einheit, zum Beispiel in einer Wirbelschicht oder in einem Schachtreaktor durch Vergasung in Prozessgas umgewandelt werden.

[0009] Im Wirbelschichtreaktor laufen die Reaktionen Thermolyse und Vergasung räumlich nicht eindeutig voneinander getrennt ab. Eine klar definierte Trennung in verschiedene Reaktionszonen ist nicht möglich. Der Wirbelschichtreaktor kann nur in einem engen Leistungsbereich betrieben werden, da das zugeführte Gas sowohl das Wirbelbett erzeugen muss als auch die Aufgabe des Reaktionsgases zu erfüllen hat.

[0010] Roste konventioneller Bauart, die bisher vorzugsweise bei der Verbrennung von Feststoffen eingesetzt werden, kommen in jüngerer Vergangenheit ebenfalls zur Vergasung von Feststoffen, vorerst nur versuchsweise, zum Einsatz. Als Vergasungsmittel dienen ebenfalls atmosphärische Luft und Wasserdampf. Die Roste müssen gegebenenfalls gegen Korrosion und Überhitzung geschützt werden.

[0011] Beim Schachtofen besteht die Schwierigkeit, eine definierte Stömungsverteilung, bezogen auf den Reaktorquerschnitt zu gewährleisten.

[0012] Alle bisher benannten Verfahren haben den Nachteil, dass die Erzeugung eines hochwertigen, heizwertreichen Prozessgases mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden ist.

## Problemlösung

[0013] Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt eine erhebliche Verbesserung der Prozessgasqualität. Die vorzugsweise durch keramische Strahlrohre erfolgende indirekte Beheizung eines Kaskadenreaktors, zum Beispiel in der konstruktiven und funktionellen Ausführung als Etagenreaktor (**Fig. 1**) oder als Rostreaktor (**Fig. 2**) erlaubt einen erhöhten Wasseranteil als Vergasungsmittel. Dies hat eine erhebliche Verbesserung der Gasqualität zur Folge. Außerdem ist eine Optimierung des Prozesses dadurch gegeben, dass die Prozessführung in definierten Reaktionszonen mit unterschiedlichen Prozesstemperaturen und Gaszusammensetzungen möglich ist. Damit wird es möglich, dass das in den Zonen Thermolyse und Vergasung entstehende Prozessgas vor dem Austritt aus dem Reaktor noch eine Hochtemperaturzone passiert, in der unter dem Einfluss von Wasserdampf eine Umwandlung der gasförmigen, kondensierbaren Kohlenwasserstoffe in unkondensierbare erfolgt. Es bedarf im Normalfall dabei keiner aufwendigen, externen Wasserdampferzeugung mit entmineralisiertem Wasser. Das in definierter Stöchiometrie einzusetzende Wasser kann den Einsatzstoffen zugemischt werden, verdampft in der ersten Reaktionszone und gelangt als Wasserdampf in die Reaktionszonen Vergasung und Crackung.

[0014] Damit wird die als Zielsetzung definierte Prozessgasqualität erreicht und das Verwertungsgebot von Reststoff-

fen, beziehungsweise Abfällen, wie im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz gefordert, besser erfüllt.

#### Anwendungsbereich

[0015] Die Anwendungsmöglichkeit besteht bei allen Projekten, die eine Reststoffentsorgung bei gleichzeitiger Verwertung zum Ziel haben. Ein weiterer Anwendungsbereich zeigt sich bei der Energieerzeugung unter Einsatz von Bio-Masse.

[0016] Aufgrund des modularen Aufbaus des apparativen Konzeptes ist das erfindungsgemäße Verfahren auch bei kleineren Kapazitäten und damit für dezentrale Energieversorgungsaufgaben geeignet.

[0017] Neben der allgemeinen Erzeugung elektrischer Energie aus organischen Feststoffen ist die Energieversorgung im industriellen Bereich von besonderem Interesse. Hier geht es sowohl um elektrische Energie als auch alternativ um Prozesswärme. Industrien, die einen besonders hohen Brennstoffbedarf haben, sind an preiswerten Brennstoffsubstituten interessiert. Diese Substitute (organische Reststoffe oder Bio-Masse) als Festbrennstoffe einzusetzen, ist in vielen Fällen verfahrenstechnisch ungünstig oder sogar unmöglich. Ein heizwertreiches, speicher- und transportfähiges Gas erhält hier den Vorzug.

[0018] Industriebranchen, in denen der Einsatz eines solchen Gases erwünscht ist, sind zum Beispiel die Ziegeleien, die Hersteller von Feuerfestmaterialien, die Kalk- und die Zementindustrie.

[0019] Für den stofflichen Anwendungsbereich seien die folgenden Beispiele genannt: Kunststoffabfälle allgemein, Dämmstoffreste, Teppichbodenreste, Kautschukabfälle, Altreifen, Shredderleichtfraktion, organische Klärschlämme, Rechengut, Tiermehl, Altholz, Schwachholz, heizwertfreie Fraktionen des Hausmülls, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall und DSD-Sortierreste.

#### Verfahrens- und Prozesstechnik

##### Etagenreaktor

[0020] Unter Hinweis auf die in **Fig. 1** eingetragenen Kennzeichnungen wird der Verfahrensablauf wie folgt beschrieben.

[0021] Der Einsatzstoff (1) wird zum Beispiel unter Einsatz einer Stopfschnecke (2) in den Kaskadenreaktor eingetragen. Der Materialtransport erfolgt durch Räumarme (3), die mit einer senkrechten, motorgetriebenen (4) Achse (5) verbunden sind. Die Räumarme bewegen sich dicht über den Etagenböden (6) und werfen das Material durch entsprechende Öffnungen wechselweise im peripheren und im Bereich der Antriebsachse (5) auf den jeweils darunter liegenden Etagenboden (6) ab.

[0022] Die indirekte Beheizung erfolgt durch Strahlrohre (7) in vorzugsweise keramischer Ausführung, die unterhalb der Etagenböden (6) angeordnet sind.

[0023] Zum Betrieb der Strahlrohre (7) kommt vorzugsweise ein Teilstrom des eigenerzeugten Prozessgases (8) zum Einsatz, der durch die Gebläseeinheit (9) zugeführt wird. Die erforderliche Verbrennungsluft (10) fördert das Gebläse (11). Das Abgas (12) gelangt über Abgasrohre und Kamin in die Atmosphäre.

[0024] In der Reaktionszone 1 wird durch die indirekte Beheizung das Temperaturenniveau ( $> 100^{\circ}\text{C}$ ) erreicht, das für die Verdampfung des in definierter Stöchiometrie den Einsatzstoffen zugegebenen Wassers erforderlich ist.

[0025] In der Reaktionszone 2 werden bei Temperaturen von etwa  $500^{\circ}\text{C}$  unter Einfluss der indirekten Beheizung die

im Einsatzstoff enthaltenen Kohlenwasserstoffe durch thermische Zerlegung (Thermolyse) in Prozessgas umgesetzt. [0026] Durch die Absaugung des Prozessgases (13) im unteren Bereich des Reaktors mit dem Gebläse (14) gelangen Wasserdampf und Thermolysegas in die Reaktionszone 3. Parallel werden der noch nicht umgesetzte Kohlenstoff (Koks) und anorganische Fraktionen der Einsatzstoffe auf die Etagenböden dieser Reaktionszone gefördert. Durch entsprechende Wärmezufuhr über die indirekte Beheizung (etwa  $850^{\circ}\text{C}$ ) erfolgt hier die endotherme Vergasung des Kohlenstoffes mit Wasserdampf.

[0027] In der Reaktionszone 4 wird die Temperatur durch die indirekte Beheizung auf etwa  $1'000^{\circ}\text{C}$  erhöht. Unter dem Einfluss dieser Temperatur und des in der Reaktionszone 3 noch nicht "verbrauchten" Wasserdampfes erfolgt die Umwandlung (Crackung) der gasförmigen Kohlenwasserstoffe, insbesondere des kondensierbaren Anteils, in Kohlenmonoxid und Wasserstoff.

[0028] Im Normalfall kann das Prozessgas zum Beispiel aus der Reaktionszone 4 abgesaugt, unter interner Abwärmenutzung gekühlt und je nach Schadstoffgehalt der Einsatzstoffe in nachgeschalteten Vorrichtungen (15) chemisch-reaktiv gereinigt werden.

[0029] Die Reaktionszone 5 übernimmt die anorganischen Fraktionen der Einsatzstoffe und die Asche mit Kohlenstoffresten. Durch die nahstöchiometrische Zuführung von Sekundärluft (16) erfolgt hier die Nachvergasung der Kohlenstoffreste. Die verbleibenden, weitgehend anorganischen Stoffe (17) werden vom untersten Räumarm ausgeworfen.

##### Rostreaktor

[0030] Die Kennzeichnungen in **Fig. 2** entsprechen weitgehend denen in **Fig. 1**. Das gilt sinngemäß auch für den verfahrens- und prozesstechnischen Ablauf, auf dessen wiederholende Beschreibung verzichtet wird.

[0031] Den Transport der Einsatzstoffe innerhalb des Reaktors übernehmen bewegliche Rostelemente (3), zum Beispiel Vor- oder Rückschubroste.

[0032] Oberhalb des Rostes eingezogene Trennwände (5) gewährleisten die Einteilung in 5 Reaktionszonen. Zwischen diesen Trennwänden sind die der indirekten Beheizung dienenden, vorzugsweise keramischen Strahlrohre (7) angeordnet. Zur Verringerung des Temperaturunterschiedes zwischen dem Rost und den darüber liegenden Reaktionszonen werden zusätzliche Strahlrohre (7) zwischen Trennwänden unterhalb (b) des Rostes eingebaut.

[0033] Die Reaktionszonen 4 oder 5 können je nach Prozessführung wahlweise für die Vergasung oder Prozessgas-crackung eingesetzt werden.

[0034] Für die Nachvergasung von Kohlenstoffresten in der Asche ist ein Schachtreaktor (18) integriert, der nahstöchiometrisch mit Luftsauerstoff beaufschlagt wird. Eine Zellenradschleuse (19) übernimmt den Austrag der anorganischen Materialfraktionen.

##### Vorteile

##### Einsatzstoffkonditionierung

[0035] Insbesondere bei der Wirbelschichttechnologie ist eine weitgehende Zerkleinerung der Einsatzstoffe erforderlich. Partikel hoher Dichte sind nur schwer zu fluidisieren.

[0036] Beim Schachtofen ist ebenfalls eine Zerkleinerung erforderlich. Eine einheitliche Partikelgröße unterstützt eine gleichmäßige Durchströmung des Schüttbettes, während eine Feinkornfraktion diese Strömung wesentlich beeinträchtigen kann.



[0037] Beim erfindungsgemäßen Verfahren genügt eine Grobzerkleinerung. Partikel hoher Dichte sind unproblematisch.

#### Energetische Wirkungsgrade

[0038] Ein besonderer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist durch den Wirkungsgrad bei der Erzeugung elektrischer Energie gegeben.

[0039] Bei der Feststoffverbrennung oder dem Einsatz unkonditionierten Prozessgases als Brennstoff wäre die Energieerzeugung mit einem Kessel und nachgeschalteter Dampfturbine mit Generator erforderlich. Bei konventionellen Großkraftwerken werden mit dieser Technik elektrische Wirkungsgrade zwischen 30% und 35%, bei kleineren Leistungsstufen 15% bis 25% erreicht. Durch unkonditioniertes Gas entstehen jedoch auch bei dieser Technologie funktionelle Probleme durch Kondensatablagerungen.

[0040] Ist aufgrund einer Schadstoffbelastung die chemisch-reaktive Gasreinigung mit Abkühlung des Gases erforderlich, so geht der kondensierbare Gasanteil, der bis zu 30% betragen kann, ungenutzt verloren und läßt je nach Gasreinigungstechnologie zusätzlich ein Abwasserproblem entstehen.

[0041] Das Gas, das mit dem erfindungsgemäßen Verfahren gewonnen wird, behält auch nach Abkühlung und Reinigung seinen vollen Energiegehalt. Da es für Gasmotore geeignet ist, werden bis zu 40% elektrischer Wirkungsgrad erreicht. Beim Einsatz in Brennstoffzellen sind etwa 60% elektrischer Wirkungsgrad möglich.

#### Gasreinigung

[0042] Die meisten Reststoffe sind mit Schadstoffen, vorzugsweise Chlor und/oder Schwefel belastet. Da diese Stoffe beim erfindungsgemäßen Verfahren weitgehend in das Prozessgas und bei der Verbrennung von Feststoffen oder unkonditionierten Gasen in das Verbrennungsgas übergehen, ist in beiden Fällen eine chemisch-reaktive Reinigung und Entstaubung erforderlich.

[0043] Diese Maßnahme ist beim erfindungsgemäßen Verfahren wesentlich kostengünstiger, da nur ein Bruchteil (1/5 bis 1/10) eines Gasmassenstroms (energetisches Prozessgas) im Vergleich mit der Verbrennung (Verbrennungsgas) gereinigt werden muss. Energieverluste durch Gaskondensate werden vermieden.

#### Gasspeicherung und -transport

[0044] Das konditionierte Prozessgas aus dem erfindungsgemäßen Verfahren ist speicherfähig und erlaubt damit einen rationellen Einsatz. Auch beim Transport durch längere Rohrleitungen kommt es nicht zu Kondensat- und/oder Feststoffablagerungen.

#### Stoffliche Verwertung

[0045] Sind in den Einsatzstoffen anorganische Materialien enthalten, zum Beispiel Edel- und Nichteisenmetalle oder liegt ein organisch-anorganischer Materialverbund vor, so liegt beim erfindungsgemäßen Verfahren das anorganische Material weitestgehend ohne organische Materialfraktionen vor. Eine Separation in Metalle und Mineralien ist durch Sichtung oder Klassierung möglich. Als stoffliches Beispiel sei hier die Shredderleichtfraktion genannt.

[0046] Das Schmelzverhalten der anorganischen Stoffe ist bei der Temperaturführung des Gesamtprozesses zu berücksichtigen.

#### Kapazitätskriterien

[0047] Das apparative Konzept erlaubt kleinere Kapazitäten mit einem Einsatzstoffmassenstrom von  $< 1 \text{ Mg/h}$  und ist damit für eine dezentrale Reststoffentsorgung und -verwertung besonders geeignet. Aufgrund des modularen Konzeptes sind jedoch auch Großanlagen möglich, die gegebenenfalls aus mehreren Verfahrenslinien bestehen können. Eine einzelne Verfahrenslinie kann apparativ für einen Einsatzstoffmassenstrom von bis zu  $20 \text{ Mg/h}$  ausgelegt werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur energetischen Verwertung organischer Stoffe und zur stofflichen und energetischen Verwertung von Gemischen aus organischen und anorganischen Stoffen oder von Stoffen im organisch-anorganischen Materialverbund unter Einsatz eines Kaskadenreaktors, **dadurch gekennzeichnet**,

dass die Einsatzstoffe mit einem stöchiometrisch definierten Wassergehalt in einen indirekt, vorzugsweise durch keramische Strahlrohre beheizten Kaskadenreaktor aufgegeben und in einer ersten Reaktionszone zur Wasserverdampfung im Sinne einer Prozessdampferzeugung bis auf etwa  $150^\circ\text{C}$  erwärmt werden und dass die Einsatzstoffe im Interesse der thermischen Zerlegung des Kohlenwasserstoffanteils in zweiter Reaktionszone in Prozessgas (Thermolysegas) bis auf etwa  $500^\circ\text{C}$  erwärmt werden und

dass der durch die Räum- beziehungsweise Materialtransportelemente des Reaktors jeweils auf die tiefer liegenden Kaskadenebenen geförderte Anteil anorganischer Stoffe und der Kohlenstoffanteil (Koks) bis auf etwa  $800^\circ\text{C}$  indirekt erwärmt und endotherm mit Wasserdampf in der dritten Reaktionszone vergast werden und

dass die erzeugten Prozessgase durch Absaugung im Gleichstrom mit den Feststoffen geführt werden, um eine vierte Reaktionszone im Bereich der unteren Kaskadenebenen zu durchströmen, so dass hier durch weitere Wärmezufuhr ( $> 1000^\circ\text{C}$ ) gasförmige, insbesondere kondensierbare Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_m\text{H}_n$ ) in unkondensierbare ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) mit Wasserdampf weitgehend umgesetzt (Crackung) werden und

dass in einer fünften Reaktionszone durch die nahstöchiometrische Zugabe von Sauerstoff Kohlenstoffreste in den Aschen vergast werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erfindungsgemäße Verfahren in Kaskadenreaktoren Anwendung findet, die als Etagenreaktor oder als Rostreaktor ausgelegt sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine in der Summe beliebige Anzahl von Kaskadenetagen, beziehungsweise -stufen innerhalb des Reaktors angeordnet sind und dass den Reaktionszonen eine beliebige Anzahl Etagen oder Stufen zugeordnet werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Prozesse der vierten Reaktionszone (Gascrackung) unter Berücksichtigung des Schmelzverhaltens anorganischer Stoffe in einer nachgeschalteten Vorrichtung ablaufen.

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Prozesse der fünften Reaktionszone in einer nachgeschalteter Vorrichtung ablaufen.

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für den Betrieb der Strahlrohre zur indirekten Reaktorbeheizung eigenerzeugtes Prozessgas als

Brennstoff zum Einsatz kommt.

7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Prozessgas aus der vierten Reaktionszone mit einer Temperatur von etwa 1'000°C durch die Strahlrohre zur indirekten Reaktorbeheizung geführt wird. 5

8. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die indirekte Beheizung des Reaktors zusätzlich durch einen beheizten Doppelmantel erfolgt.

9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ergänzend zur indirekten Beheizung ein Teilstrom des eigenerzeugten, heißen Prozessgases im Kreislauf durch den Reaktor geführt wird. 10

10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Reaktionen im gesamten Reaktor auf die Wasserverdampfung bei Temperaturen von etwa 150°C und die thermische Zerlegung der Kohlenwasserstoffe bei Temperaturen von etwa 500°C beschränkt und sowohl die Crackung gasförmiger, kondensierbarer Kohlenwasserstoffe als auch die energetische Verwertung des Kohlenstoffes in nachgeschalteten Vorrichtungen außerhalb des Kaskadenreaktors durchgeführt werden. 15 20

11. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der für die Reaktionen erforderliche, von außen gegebenenfalls zugeführte Sauerstoff in Form des Luftsauerstoffes (atmosphärische Luft), des reinen Sauerstoffes oder als sauerstoffangereicherte Luft zum Einsatz kommt. 25

12. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelung einer charakteristischen Prozesstemperaturen sowie des geforderten Heizwertes des Prozessgases über die in die verschiedenen Reaktionszonen von außen zugegebene Luft- oder Wassermenge oder über eine definierte Kombination aus beiden erfolgt. 30 35

13. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Abzug des Prozessgases nicht nur in der vierten Reaktionszone, sondern je nach beabsichtigter Prozessführung in anderen Reaktionszonen erfolgt.

14. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Zuführung von zusätzlichen Vergasungsmitteln von außen in verschiedenen Reaktionszonen erfolgt. 40

15. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Verbrennungsluft für den Betrieb der zur indirekten Beheizung eingesetzten Strahlrohre durch interne Abwärmenutzung vorgewärmt wird. 45

16. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Heizwert und Temperatur des Prozessgases, insbesondere bei heterogener Zusammensetzung des Einsatzstoffes, durch ein definiertes Gemisch mehrerer, qualitativ unterschiedlicher Einsatzstoffe eingestellt werden. 50

17. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Reaktionstemperaturen durch die indirekte Beheizung einsatzstoffbezogen definiert geregelt wird. 55

18. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Heizwert des Prozessgases über die von außen gegebenenfalls zugeführten Mengen und über die Zusammensetzung der Vergasungsmittel geregelt wird. 60

19. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass den Einsatzstoffen je nach Art und Gehalt von Schadstoffen entsprechende Additive zur Schadstofffeinbindung zugemischt werden. 65

20. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass den Einsatzstoffen geeignete Stoffe zuge-

mischt werden, um das Schmelzverhalten der Aschen zu beeinflussen.

21. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Kühlung des Prozessgases auf eine für die Gasreinigung (z. B. Entstaubung) erforderliche Temperatur ein Wärmetauscher zur internen Abwärmenutzung nachgeschaltet wird.

22. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für den Fall der Zuführung zusätzlicher Vergasungsmittel atmosphärische Luft, sauerstoffangereicherte Luft, reiner Sauerstoff und Wasserdampf zum Einsatz kommen.

23. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur in der dritten, vierten und fünften Reaktionszone so gewählt werden, dass ein Schmelzen der anorganischen Stoffe vermieden wird.

24. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass innerhalb des Reaktors oder in einer nachgeschalteten Vorrichtung dem Prozessgas bei einer Temperatur von etwa 1'100°C stöchiometrisch oder überstöchiometrisch extern erzeugter Wasserdampf zugegeben wird, um durch die Wassergasreaktion den Wasserstoffanteil zu Lasten des Kohlenmonoxidgehalts im Prozessgas zu erhöhen und durch den endothermen Prozess gleichzeitig eine Gaskühlung zu bewirken, sowie eine Gasqualität zu erreichen, die für den Einsatz in Brennstoffzellen besonders geeignet ist.

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

**THIS PAGE BLANK (US.)**

- Leerseite -

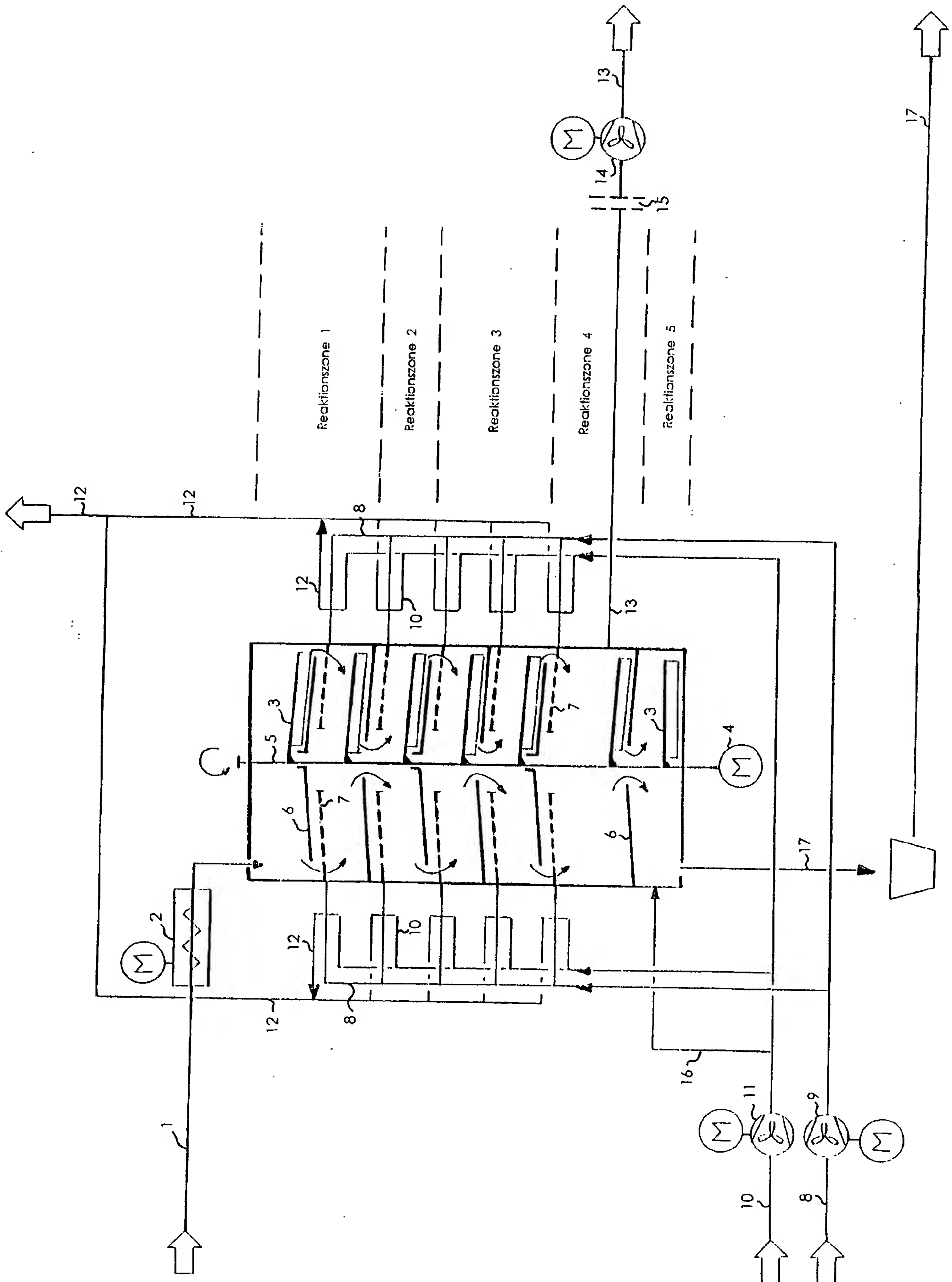


Fig. 1

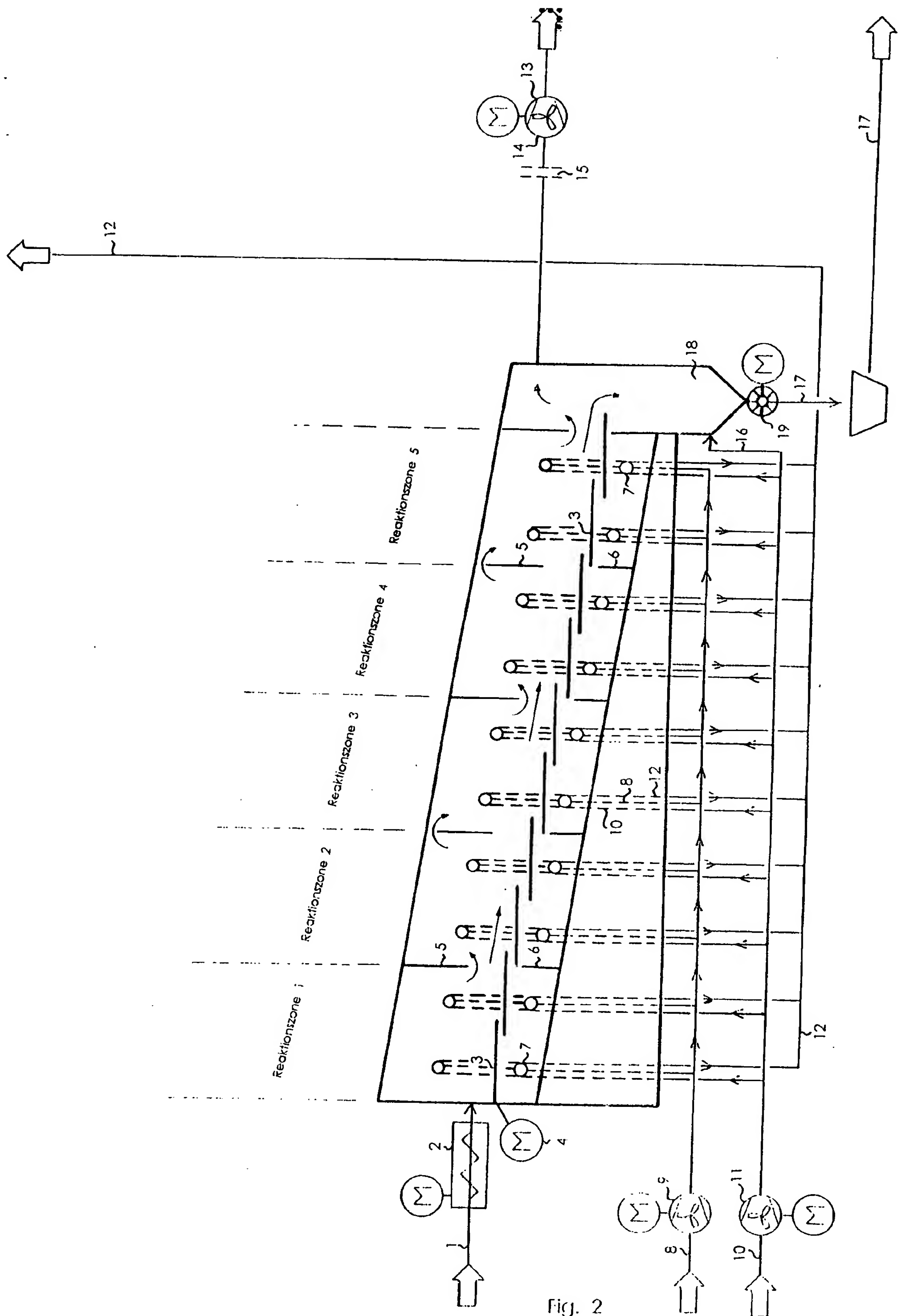


Fig. 2